

# 1 Le modèle de l'optique géométrique

## 1.1 Approximation de l'optique géométrique

Pour l'étude des systèmes optiques courants (loupe, appareil photo, lunette astronomique, microscope, fibre optique, etc.) un modèle simplifié de la lumière est suffisant : l'optique géométrique.

En optique géométrique, on néglige tout aspect ondulatoire et quantique de la lumière. Dans ce modèle, la lumière est décrite par un ensemble de rayons lumineux indépendants, caractérisés par une direction de propagation  $\vec{u}$  et une vitesse de propagation  $v$ .

En notant  $D$  la dimension caractéristique des obstacles (miroirs, trous, lentilles ...) et  $\lambda$  la longueur d'onde, l'approximation de l'optique géométrique est bonne si :  $D \gg \lambda$

**Exemples :** Peut-on appliquer les lois de l'optique géométrique

- Pour un faisceau lumineux qui se propage à l'intérieur d'un objectif de smartphone ?  
Oui, car les lentilles d'un objectif de smartphone sont généralement de taille du millimètre, bien plus grande que la longueur d'onde de la lumière visible.
- Pour un faisceau laser qui rencontre un cheveu ?  
Non, car un cheveu a un diamètre typique de 50 à 100 micromètres, soit proche de quelques centaines de fois la longueur d'onde du faisceau laser visible.

## 1.2 Notion de rayon lumineux

Dans le cadre de l'optique géométrique, la propagation de l'énergie lumineuse est décrite à l'aide de la notion de rayon lumineux vérifiant les propriétés suivantes :

- Propagation rectiligne : Les rayons lumineux se propagent en ligne droite dans un milieu transparent (d'indice  $n$ ), homogène ( $n$  ne dépend pas de la position) et isotrope ( $n$  ne dépend pas de la direction de propagation).
- Principe du retour inverse de la lumière : Le trajet suivi par la lumière entre deux points situés sur le même rayon lumineux est indépendant du sens de propagation de la lumière.
- Indépendance des rayons lumineux : Il n'y a pas de phénomènes d'interférences, les rayons lumineux qui se croisent n'interagissent pas entre eux, ils se propagent de façon entièrement indépendante.

**Remarque :** Les rayons lumineux sont un modèle qui permet de décrire la propagation de l'énergie lumineuse dans le cadre de l'optique géométrique, mais cette notion est purement conceptuelle, toute expérience cherchant à isoler un rayon lumineux n'est pas possible.

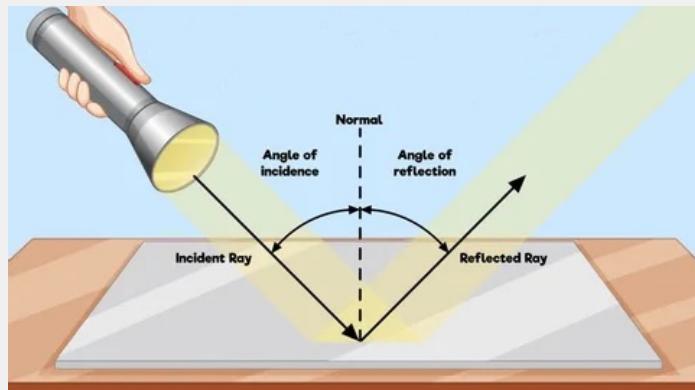
En effet, lorsqu'on envoie une onde lumineuse sur un petit obstacle (ou une petite fente), celle-ci se trouve redirigée dans plusieurs directions. Et on ne pourra plus parler de rayon lumineux dans ce cas, cela contredit le modèle de rayon lumineux de l'optique géométrique.

## 2 Les différents phénomènes de propagation

### 2.1 La réflexion

Lorsqu'un rayon arrive à l'interface entre deux milieux isotropes et homogènes différents, il donne naissance à un rayon réfléchi c'est-à-dire qui repart de la surface dans le même milieu que celui dans lequel s'est propagé le rayon incident. La réflexion est un phénomène où la lumière change de direction lorsqu'elle arrive sur une surface et prend une direction symétrique. Ce comportement est couramment observé avec les miroirs.

Phénomène de réflexion de la lumière



Le rayon réfléchi est symétrique du rayon incident (émis par la source de lumière) par rapport à la normale (droite perpendiculaire à la surface de réflexion). L'angle d'incidence est égal à l'angle de réfraction.

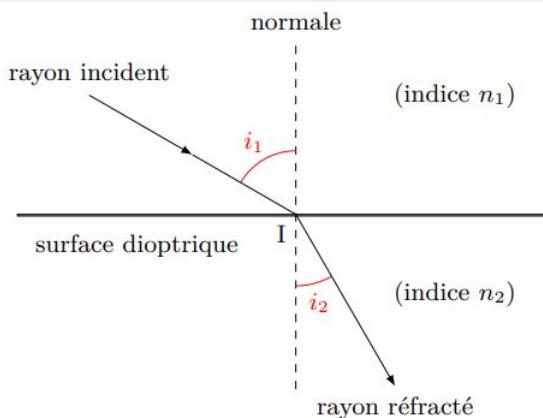
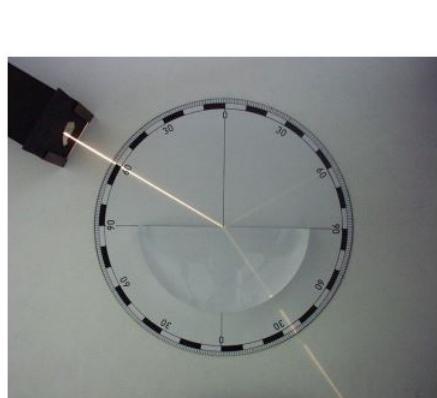
**Exemples :** Un rayon lumineux se propageant dans l'air arrive à la surface d'un lac. Le rayon incident arrive en formant un angle d'incidence  $i_1 = 38^\circ$ . L'angle de réflexion  $i_2$  du rayon réfléchi sera aussi de  $38^\circ$ .

### 2.2 La réfraction

Si on envoie un rayon lumineux sur une interface séparant deux milieux transparents, on observe l'existence d'un rayon réfracté, c'est-à-dire qui traverse l'interface et se propage dans le milieu de l'autre côté de celle-ci.

La réfraction est la déviation de la lumière lorsqu'elle traverse l'interface entre deux milieux transparents d'indices optiques différents.

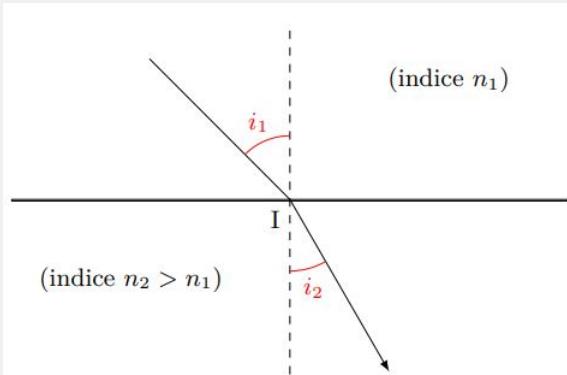
Phénomène de réfraction de la lumière



**Exemples :** Une application classique de cette propriété est que le fond d'un bassin ou d'un ruisseau paraît situé moins profondément qu'il ne l'est réellement. C'est également cette propriété qui explique qu'un bâton plongé dans l'eau semble coudé au niveau de la surface.

Si le rayon de lumière passe d'un milieu à un autre d'indice plus élevé, alors il est réfracté (dévié) en se rapprochant de la normale. Dans cette situation, il existe toujours un rayon réfracté.

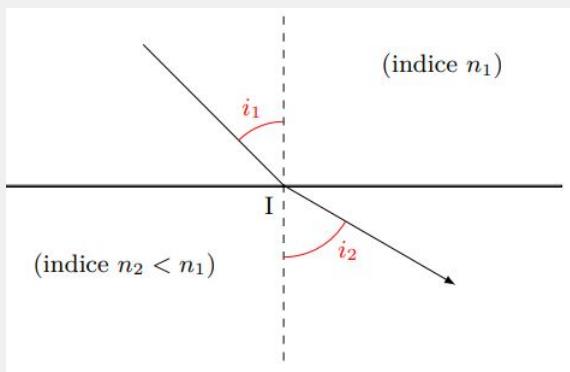
#### Phénomène de réfraction de la lumière d'un milieu à un autre d'indice plus élevé



**Remarque :** La réfraction limite est obtenue lorsque l'angle d'incidence vaut  $i_1 = 90^\circ$ . La valeur de l'angle de réfraction limite : c'est la valeur maximale que peut prendre l'angle de réfraction.

Si le rayon de lumière passe d'un milieu à un autre d'indice moins élevé, alors il est réfracté (dévié) en s'éloignant de la normale.

#### Phénomène de réfraction de la lumière d'un milieu à un autre d'indice plus élevé

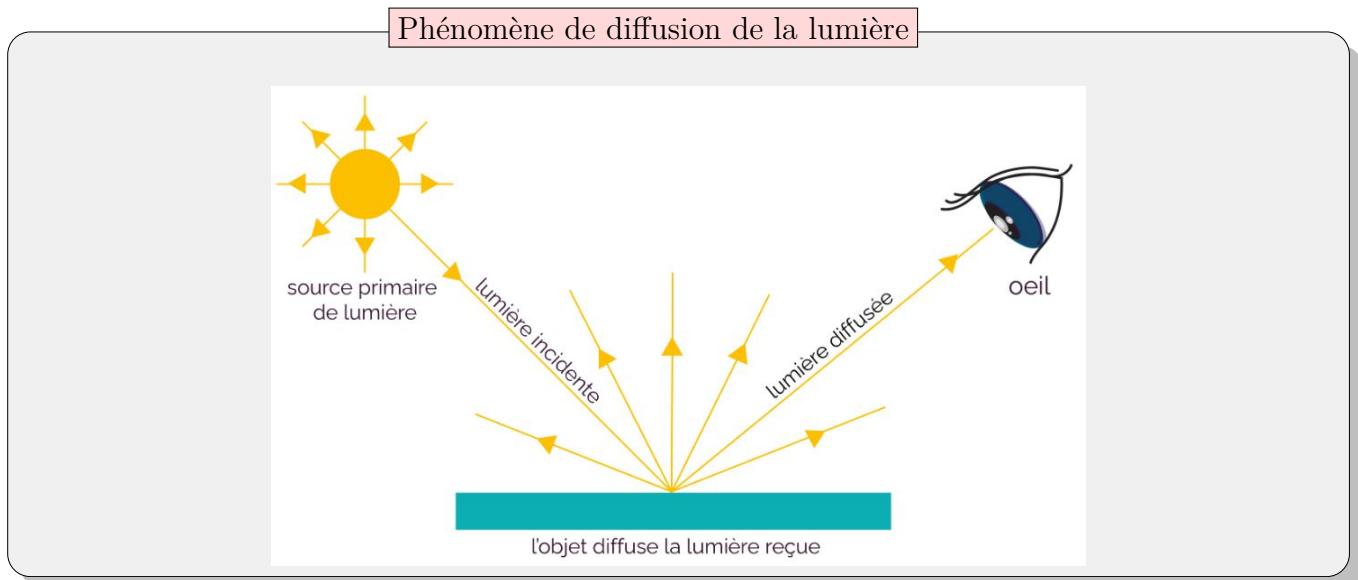


**Remarque :** L'angle de réfraction vaut, au maximum,  $90^\circ$ . Alors l'angle d'incidence a une valeur limite notée  $i_{lim}$ . Si l'angle d'incidence est supérieur à cette valeur limite, il n'existe pas de rayon réfracté, toute la lumière est réfléchie, on parle de réflexion totale.

## 2.3 La diffusion

Lorsqu'une surface renvoie la lumière dans toutes les directions, on dit qu'elle diffuse la lumière : c'est le phénomène de diffusion.

Lors de la diffusion, la lumière n'est pas renvoyée dans une direction privilégiée contrairement à la réflexion.

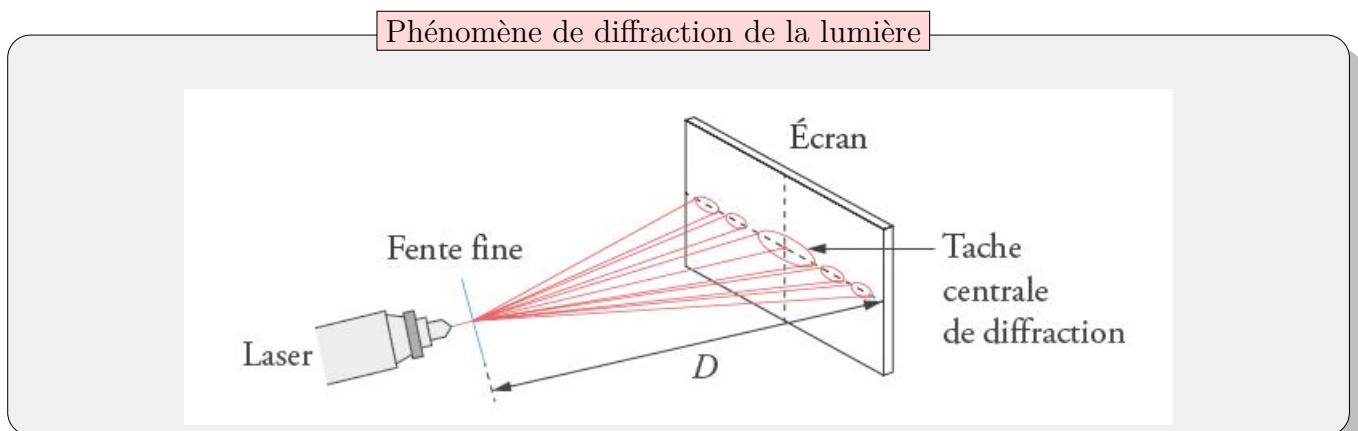


**Exemple :** La Lune est éclairée directement par la lumière du Soleil, c'est la diffusion de cette lumière selon les angles créés par la variation des positions du Soleil, de la Terre et de la Lune qui cause les phases lunaires.

## 2.4 La diffraction

La diffraction est un phénomène qui se produit lorsque la lumière rencontre un obstacle ou une ouverture dont les dimensions sont de l'ordre de sa longueur d'onde et se produit pour des obstacles de taille jusqu'à une centaine de fois la longueur d'onde  $\lambda$ . Ce phénomène ne peut pas être expliqué avec le modèle de rayon lumineux, mais nécessite au contraire de considérer la lumière comme une onde.

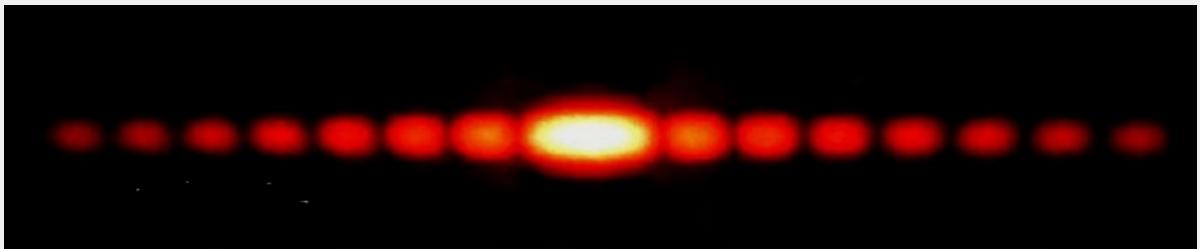
Lorsqu'on envoie une onde lumineuse sur un petit obstacle (ou une petite fente), celle-ci se trouve redirigée dans plusieurs directions. Ce phénomène est appelé diffraction. On ne pourra plus parler de rayon lumineux dans ce cas.



**Remarque :** Ce phénomène de diffraction montre clairement que la lumière ne se propage pas seulement en ligne droite. Ainsi, la diffraction révèle les limites de l'optique géométrique et justifie le recours à l'optique ondulatoire, qui décrit la lumière comme une onde électromagnétique.

Si on place ensuite un écran après l'obstacle ou la fente, à une distance  $D$ , alors on observe une figure de diffraction provoquée par la fente ou l'obstacle. La figure de diffraction se présente sous la forme d'une tâche centrale brillante, entourée de tâches secondaires, régulièrement espacées les unes des autres et séparées par des zones sombres. L'intensité lumineuse des tâches décroît quand on s'éloigne du centre de la figure.

Observation d'une figure de diffraction de la lumière



### 3 Lentille mince convergente

#### 3.1 Définitions

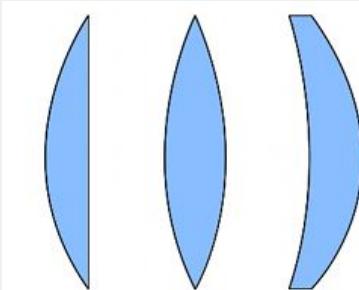
Une lentille est un bloc homogène de matériau transparent délimité par deux dioptres sphériques ou par un dioptre sphérique et un dioptre plan.

Les lentilles plus épaisses au centre que sur les bords sont convergentes.

On parle de lentilles minces si l'épaisseur du milieu de la lentille est très inférieure aux rayons des surfaces courbes.

De nombreux objets de la vie courante sont constitués de lentilles : lunettes de vue, lentilles de contact, appareil photo, lunette astronomique, ...

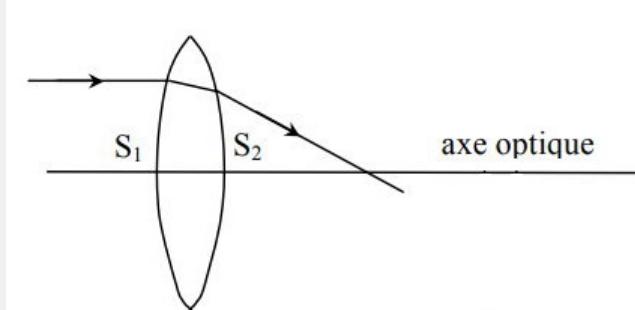
Lentilles convergentes



#### 3.2 Effet sur les rayons lumineux

Elles transforment un rayon incident parallèle à l'axe optique en un rayon qui est rabattu vers cet axe. Le rayon lumineux est dévié par la lentille. C'est le phénomène de réfraction qui est à l'origine de la déviation de la lumière par une lentille.

Effet d'une lentille mince convergente sur un rayon lumineux



## 4 Microscopie : principes, types et applications

### 4.1 Microscopie optique

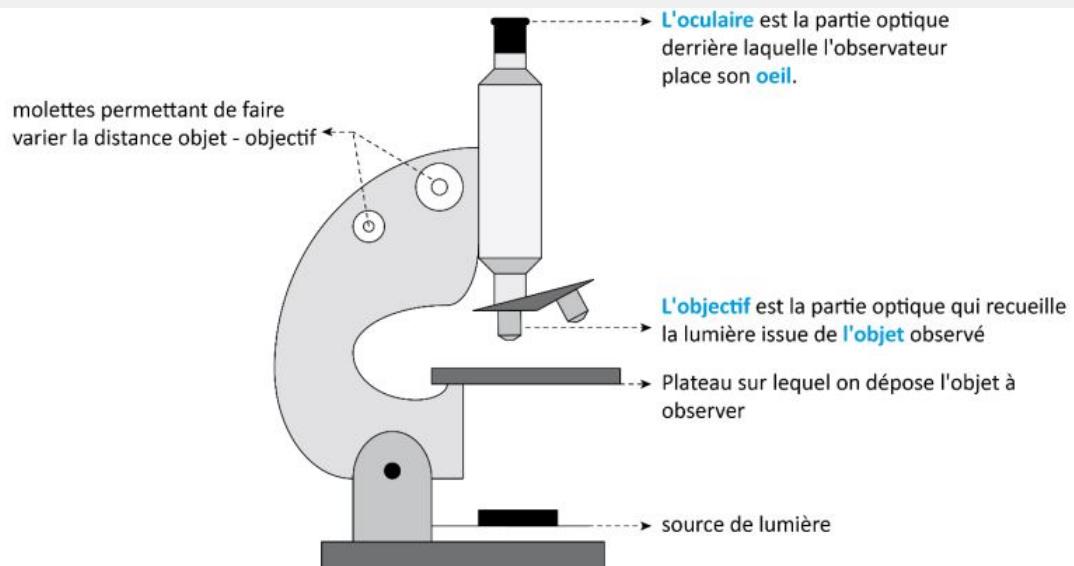
#### 4.1.1 Principe général

La microscopie optique utilise de la lumière visible pour éclairer un objet très petit et observer l'image agrandie grâce à un système de lentilles convergentes. Il destiné à observer des objets ou des détails d'objets dont les tailles sont de l'ordre du micromètre.

L'image obtenue est une image agrandie. Cette image est formée par deux éléments principaux :

- L'objectif : il est une association convergente de lentilles. C'est la partie optique qui recueille la lumière issue de l'objet observé.
- L'oculaire : il est une association convergente de lentilles. C'est la partie optique derrière laquelle il faut placer son œil pour voir l'image formée par l'instrument.

Schéma d'un microscope optique



Pour être observable par l'œil sans effort d'accommodation, l'image donnée par le microscope doit se former à l'infini. Des molettes (vis micrométrique et macrométrique) permettent de faire varier la distance objet-oculaire jusqu'à ce que cette condition soit réalisée : On dit alors que le microscope est mis au point.

Le microscope est mis au point lorsque l'image formée par l'oculaire est à l'infini.

#### 4.1.2 Constituants d'un microscope optique

Un microscope optique est composé de plusieurs parties regroupées en deux grandes catégories : les éléments optiques et les éléments mécaniques :

- Éléments optiques (permettent la formation de l'image) : Objectif, oculaire, condenseur, source lumineuse, diaphragme, ...
- Éléments mécaniques (permettent le maintien et le réglage) : Pied/Socle, bras, platine, vis macrométrique, vis micrométrique, tourelle porte-objectifs, ...

#### 4.1.3 Grossissement d'un microscope

Le grossissement du microscope est défini par la relation :

##### Relation de grossissement

$$G = \frac{\theta_2}{\theta_0}$$

- $G$  : grossissement
- $\theta_2$  : angle sous lequel on voit l'image à travers le microscope (rad)
- $\theta_0$  : angle sous lequel on voit l'objet sans le microscope (mais placé à la distance minimale de vision nette de l'œil c'est à dire 25 cm) (rad)

On considère que c'est en le plaçant à 25 cm de notre œil qu'un objet est vu avec l'angle le plus élevé, sans que l'effort d'accommodation ne soit douloureux. Si un microscope a un grossissement de 100, l'image qu'il donne est vu avec un angle 100 plus élevé que l'objet observé à l'œil nu à 25 cm.

Habituellement, on donne une expression différente du grossissement à partir des indications du fabricant :

##### Relation de grossissement

$$G = \gamma_{\text{objectif}} \times G_{\text{oculaire}}$$

- $G$  : grossissement
- $\gamma_{\text{objectif}}$  : grandissement de l'objectif (gravé sur l'objectif)
- $G_{\text{oculaire}}$  : grossissement de l'oculaire (gravé sur l'oculaire)

Modifier le grossissement du microscope requiert de changer d'oculaire et/ou de changer d'objectif.

**Exemple :** Un microscope est constitué d'un oculaire ( $\times 30$ ) et d'un objectif ( $\times 10$ ). Les indications  $\times 30$  et  $\times 10$  correspondent respectivement au grossissement de l'oculaire et au grandissement de l'objectif. Le grossissement du microscope sera de :  $G = \gamma_{\text{objectif}} \times G_{\text{oculaire}} = 10 \times 30 = 300$

Le microscope a un grossissement de 300.

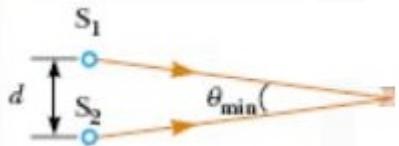
#### 4.2 Le pouvoir de résolution

Le pouvoir de résolution d'un instrument d'optique (ou de l'œil) est l'angle minimal entre deux points objets pouvant être nettement distingués.

Plus cet angle est faible, meilleure est la qualité de l'instrument car celui-ci permet l'observation de détails fins.

Pour l'œil humain, ce pouvoir de résolution vaut en moyenne  $3 \times 10^{-4}$  rad (0,2 mm) : ceci signifie que si deux détails d'un objet sont séparés d'un angle inférieur à cette valeur, nous ne pouvons pas les distinguer. Pour le microscope optique, il peut distinguer des objets séparés par environ 200 nm

### Pouvoir de résolution de l'œil



Le pouvoir de résolution d'un instrument est limité par le phénomène de diffraction du faisceau de lumière à l'entrée de l'instrument.

Plus l'objectif de l'instrument a un diamètre élevé, moins la diffraction est importante et plus le pouvoir de résolution est faible (et donc plus les détails apparaissent nettement).

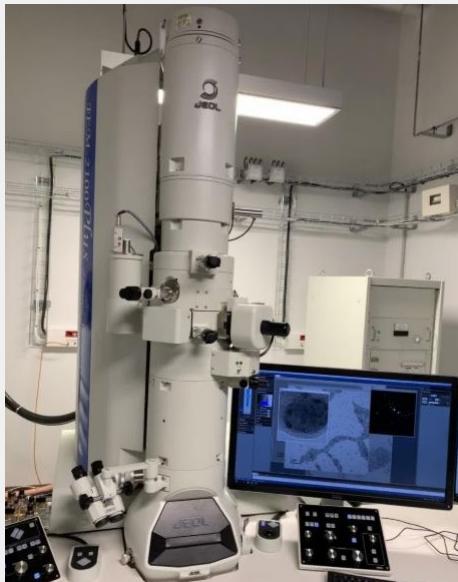
**Remarque :** Cela ne signifie pas que l'on ait forcément intérêt à utiliser, pour un microscope, un objectif au diamètre le plus large possible car cela limite certes la diffraction mais augmente les aberrations des lentilles et diminue sa profondeur de champ. Il y a donc des compromis à faire entre ces différentes contraintes.

## 4.3 Microscopie électronique

Les microscopes électroniques diffèrent des microscopes optiques car ils produisent l'image d'un spécimen en utilisant un faisceau d'électrons et non pas un faisceau de lumière.

Les électrons ont une longueur d'onde beaucoup plus courte que la lumière visible, ce qui permet aux microscopes électroniques de produire des images de résolution supérieure à celles des microscopes optiques classiques.

### Microscope électronique



Il existe deux types de microscopes électroniques :

- MEB (Microscope électronique à balayage) : donne une image de surface en 3D.
- MET (Microscope électronique en transmission) : image des structures internes, en 2D très fine.

Le microscope électronique a un grossissement qui peut aller jusqu'à 2 000 000 fois et un pouvoir de résolution compris entre 0,1 et 0,5 nm.

La microscopie électronique permet d'observer des structures bien plus petites que ce que permet le microscope optique. La limite de résolution impose le recours à la microscopie électronique pour des observations à l'échelle nanométrique.